

УДК 629.735.083.004.58

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-86-99

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ПРОЧНОСТИ ПО УСЛОВИЯМ ВИЗУАЛЬНОЙ КОНТРОЛЕ ПРИГОДНОСТИ УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОМПОЗИТНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

С.В. ДУБИНСКИЙ¹, Ю.М. ФЕЙГЕНБАУМ², В.Я. СЕНИК¹

¹Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Россия

²Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации,
г. Москва, Россия

Одним из основных критериев прочности композитной авиационной конструкции по условиям допускаемых повреждений является минимальный размер дефекта от случайного ударного повреждения, который гарантированно обнаруживается при стандартных формах технического обслуживания самолета. Прочность конструкции, имеющей такие (называемые BVID – Barely Visible Impact Damage) и меньшие повреждения должна быть обеспечена при расчетной нагрузке. В работе выполнен анализ эксплуатационных факторов, влияющих на величину этого критерия. Исследовано влияние квалификации персонала, цвета поверхности, уровня загрязненности, расстояния до объекта, а также явления изменения размера дефекта во времени вследствие релаксации внутренних напряжений в поврежденной конструкции. Исследования проводились с использованием 90 углепластиковых трехстрингерных панелей различного цвета и степени чистоты, на которые 25-миллиметровым сферическим бойком были нанесены ударные повреждения. Всего было нанесено 80 ударов с энергией в диапазоне 3–107 Дж. В эксперименте по визуальной обнаруживаемости повреждений в различных условиях участвовали 42 специалиста, в том числе 25 сотрудников авиакомпаний. При статистической обработке экспериментальных данных и определении зависимости вероятности обнаружения повреждения от его размера использовалась функция Вейбулла. Оценка размера BVID по критерию «90/95» (95 % проверяющих должны обнаружить не менее 90 % дефектов с размером не меньше BVID) выполнялась с помощью технологии бутстреп-моделирования. Результаты проведенного исследования позволили оценить степень влияния различных эксплуатационных факторов на надежность выявления повреждений при визуальном эксплуатационном контроле и определить значения BVID в зависимости от комбинации этих факторов. В частности, показано, что на синей поверхности повреждения в ПКМ видны лучше, чем на красной или серой, при любом расстоянии до объекта. Выполненные исследования продемонстрировали существенное влияние релаксации (эффекта уменьшения со временем под воздействием различных факторов размеров поверхностного дефекта в композитной панели) на возможность выявления дефекта в эксплуатации. При этом критическое по сравнению с другими факторами влияние на релаксацию повреждений в ПКМ оказывает режим влагонасыщения конструкции при повышенных температурах.

Полученные результаты хорошо согласуются с опубликованными в иностранных источниках данными, существенно их дополняя и конкретизируя. На основе проведенных исследований сформулирован ряд рекомендаций для разработчиков и эксплуатантов авиационных конструкций из композиционных материалов.

Ключевые слова: композитная конструкция, малозаметное ударное повреждение (BVID), осмотр, релаксация.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время общепринятым подходом при проведении работ по обеспечению прочности композитных конструкций по условиям эксплуатационной живучести является классификация ожидаемых повреждений по пяти категориям по степени повреждения и надежности его обнаружения при визуальном контроле [1]. Степень серьезности повреждения определяется в зависимости от времени или наработки, в течение которой данное повреждение будет обнаружено и устранено с учетом принятой программы технического обслуживания. Для каждой категории установлены требования по статическим и усталостным нагрузкам, которые должна выдерживать конструкция в эксплуатации вплоть до момента обнаружения повреждения. Ключевым требованием является то, что любое повреждение в композитной конструкции должно либо быть обнаружено, либо не должно снижать прочность конструкции ниже расчетной

нагрузки [1]. Для того чтобы обосновать соответствие конструкции этому требованию, необходимо определить порог визуальной контролепригодности, также известный как едва видимое ударное повреждение или BVID (BVID – Barely Visible Impact Damage).

Основы современной методологии обеспечения прочности по условиям допустимости повреждений, принятой сертифицирующими органами и применяемой ведущими мировыми разработчиками, были заложены в 90-х годах XX века. Значительный объем данных, собранных при эксплуатации самолетов военно-воздушных [2] и военно-морских [3] сил США, позволили установить практический критерий порогового значения обнаруживаемости для композитной панели крыла $\delta_{\text{BVID}} = 0,25$ мм.

Большой вклад в изучение этого вопроса внесли разработчики первого поколения пассажирских самолетов с композитными элементами планера Aerospatiale [4], Boeing [5] и Airbus [6], которые собрали и обработали огромное количество эмпирических данных в обоснование критерия визуальной обнаруживаемости. К сожалению, этих данных не найти в открытых источниках. Среди доступных публикаций можно упомянуть работы, выполненные в США под эгидой FAA, [7] и [8], а также два отчета по проектам, выполненным в Европе, [9] и [10]. Результаты, приведенные в них, в целом подтвердили надежность принятого критерия BVID, а также позволили охарактеризовать влияние на визуальную обнаруживаемость эксплуатационных факторов.

Пожалуй, наиболее критическим фактором среди них является эффект изменения размеров во времени, или «релаксация» повреждения. Это явление может привести к тому, что повреждение, хорошо видимое сразу после удара, становится труднообнаруживаемым со временем, притом что разрушения внутренней структуры в полимерном композиционном материале (ПКМ) сохраняются на том же уровне. Работ в открытой печати на эту тему также известно мало, можно только упомянуть публикации [11–12], в которых изучение релаксации ударных повреждений проводилось сначала на элементарных образцах, а затем было продолжено на композитных панелях, подкрепленных Ω -стрингерами. Значимые данные по влиянию некоторых эксплуатационных факторов на релаксацию вмятин в ПКМ приведены в докладе Airbus [6], посвященном обеспечению прочности по условиям допускаемых повреждений.

Результаты, полученные в рамках этих работ, обладают несомненной ценностью и могут быть использованы в качестве референтных значений BVID, однако область их применения не безгранична. Как известно, наиболее надежным источником данных для обоснования прочности самолета является накопленный опыт эксплуатации, и в этой связи для сертификации самолета MC-21 необходим отдельный анализ, учитывающий специфику отечественных условий, технического обслуживания, квалификации персонала и других факторов, влияющих на рассматриваемый критерий прочности [13]. Для анализа влияния этих факторов на BVID было проведено настоящее исследование, основная цель которого состояла в том, чтобы оптимизировать программу технического обслуживания композитного крыла путем обоснования адекватного критерия прочности.

МЕТОДОЛОГИЯ

Экспериментальные образцы. Программа экспериментальных исследований была разработана в соответствии с оригинальной методологией [14], ориентированной на учет ключевых аспектов в области проектирования, изготовления испытаний и эксплуатации, которые могут потенциально повлиять на определение BVID. Ее схема приведена на рис. 1, она предполагает максимальную представительность применяемых методов с точки зрения их соответствия типовой конструкции.



Рис. 1. Общая схема эксперимента по определению BVID
Fig. 1. The general scheme of BVID experimental evaluation

В частности, образцы для испытаний должны быть изготовлены и окрашены по серийной технологии, сценарии и методика нанесения ударных воздействий должны быть обоснованы опытом эксплуатации, осмотр должны проводить эксперты, аттестованные в соответствии с действующей системой подготовки персонала, и т. д.

Для эксперимента было изготовлено 90 углепластиковых панелей, подкрепленных т-образными стрингерами, с размером $320 \times 320 \times 3,2$ мм, полностью аналогичных панелям, применяемым в хвостовом оперении (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид образца
Fig. 2. The specimen

Обшивка и стрингер панелей состоят из девяти слоев препрега HexPly на основе углеродного (M21/34%/UD194/IMA) и стеклянного (M21/45%/120) волокна. После покраски образцов на серийном заводе на панели 25-миллиметровым сферическим бойком были нанесены ударные повреждения с передачей энергии в диапазоне 3–107 Дж. Измерения повреждений выполнялись контактным глубиномером, установленным на штативе. Глубины вмятин, образовавшихся в результате, оказались в интервале 0,01–1,68 мм. Все панели, как с ударами, так и без, были скомпонованы в планшеты 3×3 штуки площадью $1,1 \text{ м}^2$, после чего производился их осмотр экспертами.

Описание эксперимента. В ходе эксперимента отрабатывалось два типа эксплуатационного контроля авиационных конструкций, применяемых в условиях аэродромного обслуживания: общий осмотр (GVI) и детальный осмотр (DET). Общий осмотр выполнялся с расстояния 3 и 5 м, детальный – с расстояния 0,7 м. При проведении общего осмотра специалистам давалось 20 секунд на каждый планшет, не разрешалось вставать из-за стола и значительно изменять угол обзора. При детальном осмотре время было ограничено 40 секундами, разрешалось ходить вокруг планшета и осматривать панели под различными углами. Все осмотры выполнялись при естественном освещении.

На первом этапе 42 специалиста, в том числе 25 сотрудников авиакомпаний, обладающих опытом в данной области, и 17 человек без квалификации, участвовали в эксперименте по проверке влияния на визуальную обнаруживаемость расстояния до объекта, квалификации контролера и цвета поверхности. Для этого осматривались чистые (незагрязненные) панели серого, красного и синего цветов, содержавшие в общей сложности 80 ударных повреждений. Выбор такой цветовой гаммы связан с особенностями ливреи основного ожидаемого заказчика MC-21 – компании «Аэрофлот».

На втором этапе изучалось влияние загрязнения поверхности. Все панели были покрыты слоем гуаши, имитирующей грязь. В опытах с загрязненными панелями участвовало 16 человек, в том числе 10 экспертов и 6 человек без опыта.

Модель статистической обработки результатов. В математической модели, используемой для анализа, обнаружение повреждения рассматривалось как случайное событие, которое может происходить с вероятностью p или не происходить с вероятностью $q = 1 - p$. Предполагалось, что вероятность обнаружения зависит от размера повреждения (глубины вмятины), квалификации специалистов, цвета краски и уровня загрязнения поверхности. Истинная вероятность обнаружения повреждения определенного размера специалистами равной квалификации в одинаковых условиях считалась неизвестной постоянной, которая должна быть определена в ходе испытаний. Число обнаружений повреждения определенного размера μ в n независимых исследованиях считалось случайной величиной, которая может принимать только дискретные целые значения 0, 1, 2, ..., n и подчиняется биномиальному распределению с параметрами p и n . Вероятность обнаружения повреждения k раз в n испытаниях может быть выражена как [15]

$$F(\mu = k|n, p) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k}, \quad (1)$$

где $\binom{n}{k} = n! / k! (n - k)!$ – биномиальный коэффициент или количество комбинаций, в которых k специалистов из n , участвующих в эксперименте, обнаруживают повреждение. Ожидаемая величина в данном случае:

$$E(\mu) = np. \quad (2)$$

Вероятность обнаружения повреждения k либо больше раз во время визуальной проверки n специалистами будет суммой вероятностей (1) для всех величин μ , для которых $k \leq \mu \leq n$:

$$F(\mu \geq k|n, p) = \sum_{\mu=k}^n \binom{n}{\mu} p^{\mu} q^{n-\mu}. \quad (3)$$

Согласно (2) точечная оценка ожидаемого значения вероятности обнаружения повреждения определенного размера может быть определена из экспериментальных данных как отношение μ (количество обнаружений) и n (общее количество испытаний): $\bar{p} = \mu/n$.

Чтобы приблизить соотношение между вероятностью обнаружения повреждения и его размером, были рассмотрены три функции: экспоненциальная, логистическая и Вейбулла. Они были использованы для согласования экспериментальных данных, полученных в разных условиях и при разном количестве испытаний. В дальнейшем отказались от экспоненциальной функции из-за противоречий в области крупных повреждений: во многих случаях она дала нереальные вероятности, $p > 1$. Аппроксимации Вейбулла и логистическая функция показали согласованность в области малых вероятностей и расхождение в области вероятностей $p > 0,7$. Численное моделирование, выполненное с помощью метода Монте-Карло [16], показало, что сумма квадратов остатков между точками теоретических и экспериментальных данных Q была меньше для уравнения Вейбулла, чем для логистического уравнения. Для проверенного набора данных $Q_{Weibull} = 1,38$ и $Q_{Logistic} = 1,58$. Таким образом, для дальнейшего анализа была выбрана функция Вейбулла

$$p = 1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^b\right). \quad (4)$$

Параметры функции Вейбулла a и b могут быть определены методом наименьших квадратов:

$$Q = \sum_{i=1}^m \left(\bar{p}_i - \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{h_i}{a}\right)^b\right) \right) \right)^2 = \min, \quad (5)$$

где \bar{p}_i – экспериментально определенная вероятность обнаружения повреждения размером h_i . Поскольку функция (5) гладкая и одномодальная, ее минимум может быть определен, к примеру, методом покоординатного спуска [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Количественные характеристики значимости эксплуатационных факторов для визуальной обнаруживаемости определялись с использованием непараметрических методов математической статистики. Для проверки однородности данных, то есть гипотезы о принадлежности выборок к одной и той же генеральной совокупности, для двух выборок при отсутствии в них совпадающих значений использовался критерий Манна – Уитни [18]. В случае трех или более выборок или в случае двух выборок с совпадающими значениями использовался k -выборочный критерий согласия Андерсона – Дарлинга [19].

Влияние квалификации персонала. Влияние квалификации персонала на обнаруживаемость ударных повреждений изучалось на чистых образцах трех выбранных цветов путем проведения эксперимента с двумя группами: группой экспертов с опытом соответствующих работ и группой без специальной подготовки. Для сравнения эффективности этих групп для каждого размера повреждения определялись разности между вычисленными средними значениями вероятности его

обнаружения. Оказалось, что за исключением небольшой группы данных (детальный осмотр вмятин глубиной свыше 0,4 мм), для всего остального диапазона размеров повреждений и типов осмотра разности вероятностей между двумя группами $p_i - p_{nq}$ проявляют заметную нестабильность. С учетом того, что средние значения этих разностей приближаются к нулю (в табл. 1 это проиллюстрировано для синих незагрязненных образцов), можно заключить, что в условиях данного эксперимента квалификация специалиста не оказала существенного влияния на вероятность обнаружения повреждений. В целях дальнейшего анализа, сосредоточенного на других эксплуатационных факторах, статистические данные из двух групп были объединены.

Таблица 1
Table 1

Вероятности обнаружения вмятин для синих незагрязненных образцов
The probabilities of detecting dents for clean blue specimens

| № | h, mm | 0,7 m | | | 3 m | | | 5 m | | |
|----|-------|-------|----------|----------------|-------|----------|----------------|-------|----------|----------------|
| | | p_i | p_{nq} | $p_i - p_{nq}$ | p_i | p_{nq} | $p_i - p_{nq}$ | p_i | p_{nq} | $p_i - p_{nq}$ |
| 1 | 0,04 | 0,95 | 1,00 | -0,05 | 0,25 | 0,00 | 0,25 | 0,10 | 0,00 | 0,10 |
| 2 | 0,05 | 0,55 | 0,31 | 0,24 | 0,05 | 0,15 | -0,10 | 0,05 | 0,08 | -0,03 |
| 3 | 0,07 | 0,95 | 0,85 | 0,10 | 0,15 | 0,39 | -0,24 | 0,05 | 0,23 | -0,18 |
| 4 | 0,08 | 0,95 | 1,00 | -0,05 | 0,00 | 0,08 | -0,08 | 0,05 | 0,00 | 0,05 |
| 5 | 0,11 | 0,95 | 0,77 | 0,18 | 0,20 | 0,15 | 0,05 | 0,15 | 0,00 | 0,15 |
| 6 | 0,12 | 0,65 | 0,54 | 0,11 | 0,05 | 0,00 | 0,05 | 0,05 | 0,00 | 0,05 |
| 7 | 0,12 | 0,80 | 0,85 | -0,05 | 0,10 | 0,08 | 0,02 | 0,05 | 0,08 | -0,03 |
| 8 | 0,20 | 0,65 | 0,77 | -0,12 | 0,35 | 0,39 | -0,04 | 0,05 | 0,08 | -0,03 |
| 9 | 0,21 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,85 | 0,92 | -0,07 | 0,60 | 0,77 | -0,17 |
| 10 | 0,31 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,85 | 0,85 | 0,00 | 0,80 | 0,85 | -0,05 |
| 11 | 0,34 | 0,95 | 1,00 | -0,05 | 0,90 | 1,00 | -0,10 | 0,85 | 1,00 | -0,15 |
| 12 | 0,34 | 1,00 | 0,92 | 0,08 | 0,80 | 1,00 | -0,20 | 0,55 | 0,85 | -0,30 |
| 13 | 0,39 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 0,92 | 0,08 | 0,95 | 1,00 | -0,05 |
| 14 | 0,39 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,85 | 1,00 | -0,15 | 0,90 | 1,00 | -0,10 |
| 15 | 0,72 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 0,92 | 0,08 |
| 16 | 0,95 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,95 | 1,00 | -0,05 | 0,90 | 0,92 | -0,02 |
| 17 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 |
| 18 | 1,08 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,95 | 0,85 | 0,10 |
| 19 | 1,10 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,95 | 1,00 | -0,05 | 1,00 | 1,00 | 0,00 |
| 20 | 1,12 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,90 | 1,00 | -0,10 |

Влияние цвета. Для оценки значимости влияния цветовой гаммы на обнаруживаемость повреждений использовалась величина относительного числа обнаруженных вмятин μ каждым из 42-х специалистов. С целью корректного сравнения, данные по серым, красным и синим образцам были взяты с одинаковым диапазоном размеров, а именно от 0,5 до 1,1 мм. Этот диапазон включал 33 вмятины на серых образцах, 17 вмятин на красных и 18 вмятин на синих.

Для всех изучаемых расстояний обзора для синих панелей средние значения относительного числа обнаруженных вмятин были больше, а коэффициенты вариации почти в два раза меньше, чем для серых и красных. Проверка на однородность данных для трех выборок, которые включали по 42 результата, показала, что все значения статистики k -выборочного критерия Андерсона – Дарлинга много больше критического значения, поэтому вероятность обнаружения значимо зависит от цвета образца. Средние значения относительной обнаруживаемости, определенные для красной и серой панелей, были очень близки друг к другу при расстоянии осмотра 3 и 5 м с почти одинаковым разбросом. Тест Манна – Уитни использовался для проверки однородности данных, получен-

ных на красных и серых образцах. Оказалось, что для расстояния обзора 3 и 5 м может быть принята гипотеза о том, что обе выборки принадлежат к одной и той же популяции с уровнем значимости 5 %, а для расстояния осмотра 0,7 м – с уровнем значимости 1,2 %.

Полученные значения вероятности обнаружения повреждений на серых и красных образцах с расстояния 0,7 м как функции размеров повреждения показали, что экспериментальные точки равномерно перемешаны, за исключением трех значений для образцов красного цвета, которые выпали из общей полосы разброса и повлияли на уровень значимости критерия. Поскольку систематического расхождения между экспериментальными точками не наблюдалось, можно предположить, что значения вероятности обнаружения на серой и красной поверхностях одинаковы, и эмпирические данные, полученные для этих двух цветов, также могут быть объединены.

Влияние расстояния. Эксперименты с красными и серыми образцами показали, что увеличение расстояния осмотра с 0,7 до 3 и до 5 м приводит к уменьшению количества обнаруженных вмятин в 2 и 3 раза соответственно. Для синих образцов наблюдалось уменьшение количества обнаруженных вмятин в 1,4 раза для расстояния осмотра 3 м и в 1,6 раза для расстояния осмотра 5 м.

Влияние загрязнения. Для оценки влияния загрязнения поверхности на визуальную обнаруживаемость композитные панели были покрыты черной гуашью, имитирующей сажевую пленку, по аналогии с наблюдавшимся в эксплуатации состоянием закрылка самолета Ту-204. Для выборок значений относительного числа вмятин, обнаруженных каждым экспертом на чистых и загрязненных образцах, проверялась гипотеза об их принадлежности к одной генеральной совокупности. Тест на однородность по Андерсону – Дарлингу для двух выборок, включающих 42 значения на чистых и 16 на загрязненных образцах, показал, что в трех случаях (красно-серый 0,7 м / синий 3 м / синий 5 м) влияние состояния поверхности на обнаруживаемость было значительным, а в других трех случаях (красно-серый 3 м / красно-серый 5 м / синий 0,7 м) влияния выявлено не было. Сделать однозначный вывод о влиянии загрязнения на основании этих данных довольно трудно, однако с уверенностью можно сказать о следующем.

Во-первых, вероятность обнаружения дефектов при загрязнении понижается, о чем свидетельствуют аппроксимирующие зависимости, приведенные на рис. 3.

Во-вторых, загрязнение поверхности привело к существенному повышению рассеяния результатов визуального контроля, то есть в некоторых случаях дефект на загрязненной поверхности может оказаться более заметным.

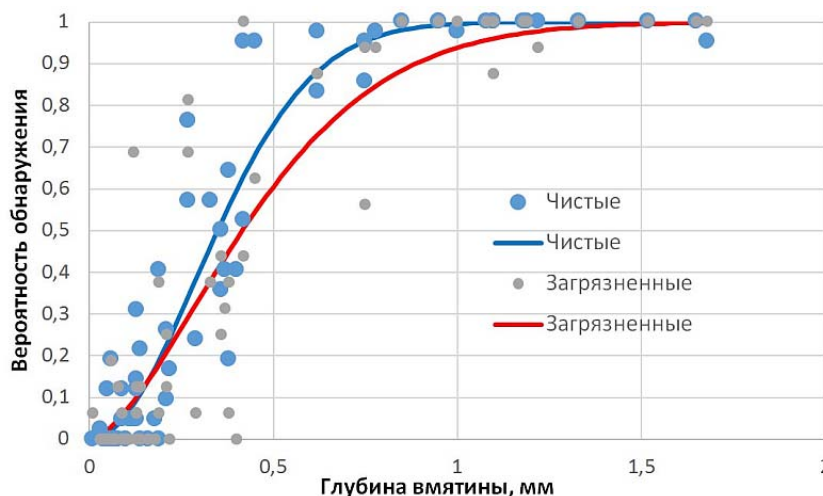


Рис. 3. Вероятность обнаружения как функция размера повреждения для красных и серых образцов при расстоянии осмотра 3 м

Fig. 3. The probability of detection as a function of damage size for red and gray specimens from viewing distance of 3 m

Методика вычисления BVID. В соответствии с практикой, принятой в авиастроении [4–6], размер BVID для композитных конструкций устанавливается по критерию «90/95»: 95 % проверяющих должны обнаружить не менее 90 % дефектов с размером не меньше BVID. Оценка этого размера выполнялась с помощью технологии бутстреп-моделирования [20], которая представляет собой непараметрический метод обработки случайных данных. Этот метод не требует предположений о законе распределения и использует только эмпирические результаты, генерируя из доступного набора случайных данных набор «фантомных» выборок. Предполагается, что имеющиеся n значений образуют генеральную совокупность, из которой случайным образом извлекаются с возвращением n значений с равными вероятностями ($1/n$) извлечения каждого, которые образуют бутстреп-выборку. Всего генерируется N выборок, и для каждой производится оценка рассматриваемой случайной величины. Затем анализируется распределение полученных оценок. Результаты экспериментов по визуальному контролю можно представить в виде таблицы, в каждой клетке которой содержится результат осмотра конкретным экспертом образца с конкретным размером повреждения. В таблице событию обнаружения повреждения соответствует цифра 1, необнаружению – цифра 0. В качестве примера в табл. 2 приведены результаты осмотров загрязненных образцов синего цвета с расстояния 3 м. Таблица включает 20 строк и 16 колонок по числу повреждений и экспертов соответственно. Строки таблицы являются выборками объема n результатов осмотров образцов с повреждениями определенных размеров.

Для каждой строки таблицы (размер повреждения) генерируются n цифр, равномерно распределенных в диапазоне $[1, n]$. Каждая цифра определяет номер ячейки в строке, используемой для извлечения значения с помещением его в новую выборку. Для новой выборки с использованием соотношений (4)–(5) строится функция Вейбулла и определяется максимальный размер повреждения, который может быть обнаружен с вероятностью 90 % (h_{90}).

Таблица 2
Table 2

Результаты контроля загрязненных синих образцов с расстояния 3 м
The inspection results for contaminated blue specimens from viewing distance of 3 m

| Глубина вмятины, мм | Номер эксперта | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 0,04 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0,05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,07 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,08 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0,12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0,20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0,21 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 0,31 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0,34 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0,34 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0,39 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0,39 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0,72 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0,95 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1,00 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1,08 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1,10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1,12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Генерация выборок и анализ Вейбулла продолжаютс \bar{a} N раз. Полученный массив, содержащий N оценок h_{90} , выстраивается в вариационный ряд в порядке возрастания величин. В соответствии с приведенным выше определением 95 % значений массива должны быть ниже размера малозаметного ударного повреждения. Таким образом, оценкой размера малозаметного ударного повреждения $h_{90/95}$ является значение h_{90} с порядковым номером $0,95N$. Число повторений «эксперимента» N выбирается из условия стабилизации значения BVID. Проведенные исследования показали, что стабилизация указанного процесса наступает после 700–800 циклов, а при объеме моделирования более 800 диапазон колебания оценки BVID не превышает $\pm 0,2$ %. Таким образом, число повторений «эксперимента» $N = 1000$ можно считать достаточным.

Полученные значения малозаметных ударных повреждений представлены в сводной табл. 2.

Влияние релаксации. После экспериментов по изучению эффективности визуального контроля работы были продолжены в направлении исследования явления релаксации. Под релаксацией здесь понимается эффект уменьшения со временем размеров поверхностного дефекта в композитной панели. Исследование проводилось на двух панелях, содержащих девять вмятин. На первом этапе релаксация исследовалась при комнатной температуре (ниже RT – Room Temperature), с регулярными измерениями в течение 97 дней. На втором этапе те же панели были помещены в климатическую камеру на 73 дня для оценки воздействия окружающей среды: одна панель влагонасыщалась при температуре 80 °C и относительной влажности 90–95 % (ниже ETW – Elevated Temperature Wet), а вторая высушивалась при температуре 70 °C и влажности 10 % (ETD – Elevated Temperature Dry). На рис. 4 представлены значения относительного коэффициента релаксации $R = \delta_R / \delta_{init}$ (отношение конечного и начального размеров вмятины) в зависимости от времени с доверительным интервалом 90 %.

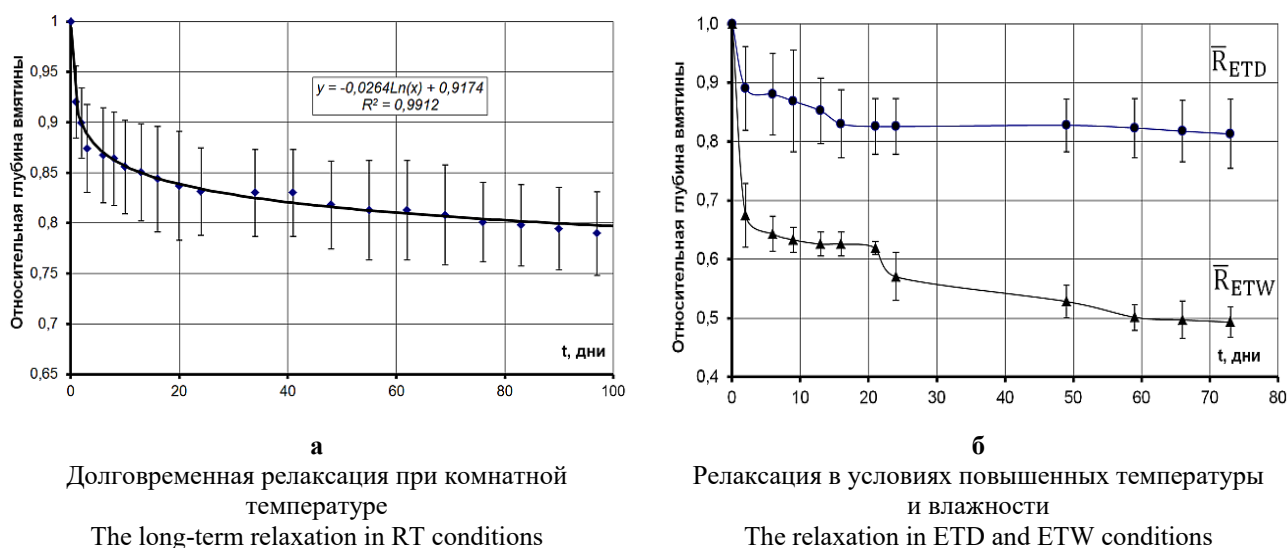


Рис. 4. Релаксации размера вмятины при различных условиях
Fig. 4. The relaxation of dent size under different conditions

Как можно видеть, наиболее значимое влияние на релаксацию оказывает комбинация повышенной температуры и влажности. К концу эксперимента средние значения коэффициентов релаксации в нормальных условиях и в комбинированном режиме «нормальный + температура-влажность» составили $\bar{R}_{RT} \approx 0,2$ и $\bar{R}_{RT+ETW} \approx 0,6$ соответственно. Следует упомянуть, что факт критического влияния влаги на релаксацию и соответствующий коэффициент снижения размера видимого дефекта хорошо согласуются с данными Airbus [6].

Критерии прочности. В табл. 3 представлена сводная информация по полученным оценкам BVID с учетом рассмотренных эксплуатационных факторов. В столбце 4 показаны результаты статистического анализа данных эксперимента по визуальному обнаружению ударных повреждений при различных условиях, в столбцах 5 и 6 те же величины приведены с учетом коэффициентов релаксации при комнатной температуре \bar{R}_{RT} и в условиях повышенного термовлажностного старения \bar{R}_{RT+ETW} .

Таблица 3
Table 3

Влияние эксплуатационных факторов на критерий BVID
Operational effects on BVID criterion

| Условия для поверхности | Цвет | Расстояние осмотра | BVID, мм | BVID _{RT} , мм | BVID _{RT+ETW} , мм |
|--------------------------|-----------------|--------------------|----------|-------------------------|-----------------------------|
| Чистая поверхность | Серый и красный | 0,7 м | 0,30 | 0,4 | 0,5 |
| | | 3,0 м | 0,69 | 0,8 | 1,1 |
| | | 5,0 м | 1,02 | 1,2 | 1,6 |
| | Синий | 0,7 м | 0,24 | 0,3 | 0,4 |
| | | 3,0 м | 0,34 | 0,4 | 0,5 |
| | | 5,0 м | 0,41 | 0,5 | 0,7 |
| Загрязненная поверхность | Серый и красный | 0,7 м | 0,91 | 1,1 | 1,5 |
| | | 3,0 м | 1,17 | 1,4 | 1,9 |
| | | 5,0 м | 1,71 | 2,1 | 2,7 |
| | Синий | 0,7 м | 0,59 | 0,7 | 0,9 |
| | | 3,0 м | 0,83 | 1,0 | 1,3 |
| | | 5,0 м | 0,88 | 1,1 | 1,4 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты и результаты анализа полученных данных позволили оценить, как эксплуатационные факторы влияют на визуальную обнаруживаемость повреждений в авиационных конструкциях из ПКМ.

Тот факт, что квалификация специалистов не оказала существенного влияния на вероятность обнаружения повреждений, позволяет сделать вывод, что квалификация и навыки эксплуатационного контроля, отработанные на парках металлических конструкций, могут оказаться неэффективными при контроле конструкций из композиционных материалов. Для решения этой проблемы необходима разработка специализированных руководящих материалов и организация учебных курсов по обслуживанию композитных конструкций.

Было установлено, что вероятность обнаружения сильно зависит от цвета. На синей поверхности повреждения в ПКМ видны лучше, чем на красной или серой при любом расстоянии до объекта. Более общая интерпретация этого результата состоит в том, что следы от ударов в ПКМ более заметны на темных покрытиях.

Однако это справедливо только при условии, что поверхность элемента чистая, поскольку загрязнение является одним из определяющих факторов и оказывает очень неоднозначное влияние на обнаруживаемость. В большинстве случаев загрязнение скрывает вмятины, но в некоторых случаях может подчеркивать их; в терминах статистики это выражается в значительном рассеянии полученных эмпирических данных. Авиакомпаниям, эксплуатирующим компо-

зитные самолеты, можно порекомендовать окрашивать внешние поверхности силовых элементов в темные цвета и содержать их в чистоте.

Выполненные исследования подтвердили критическое по сравнению с другими факторами влияние на релаксацию повреждений в ПКМ режима влагонасыщения при повышенных температурах. При наихудшей комбинации условий окружающей среды в течение относительно небольшого промежутка времени, сравнимого с интервалами между легкими формами обслуживания, глубина вмятины может уменьшиться более чем вдвое.

Таким образом, полученные результаты показывают, что эксплуатационные факторы могут оказывать существенное влияние на визуальную контролепригодность повреждений в ПКМ и для обеспечения должного уровня безопасности композитного самолета программа его технического обслуживания обязательно должна учитывать соответствующие сценарии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Horton, R., Whitehead, R.** Damage tolerance of composites: final report, Rept. AFWAL-TR-87-3030, Wright-Patterson AFB, OH, 1988.
2. **Kan, H.P., Cordero, R., Whitehead, R.S.** Advanced certification methodology for composite structures, Rept. DOT/FAA/AR-96/111, Naval Air Warfare Center-Aircraft Division Department of the Navy, Patuxent River, MD, 1997.
3. **Tropis A.** Certification of the composite outer wing of the ATR72 / A. Tropis, M. Thomas, J. Bounie, P. Lafon // Proceedings of the Institution of mechanical Engineers Part G. 1995. Vol. 209, issue, 4. Pp.327–339 DOI: 10.1243 / PIME_PROC_1995_209_307_02
4. **Fawcett, A.J., Oaks, G.D.** Boeing composite airframe damage tolerance and service experience, workshop for composite damage tolerance and maintenance: Presentation #2 of Session 1. National Institute for Aviation Research. Chicago. IL, 2006.
5. **Morteau, E., Fualdes, C.** Airbus composites damage tolerance methodology, workshop for composite damage tolerance and maintenance: Presentation #1 of Session 1. National Institute for Aviation Research. Chicago. IL, 2006.
6. **Spencer F.W.** Visual inspection: Research Project Report on Benchmark Inspections // Technical Report No DOT/FAA/AR-96/65, U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. Washington, D.C., 1996. 59 p. DOI: 10.21949/1403546
7. **Erhart, D., Ostrom, L.T., Wilhelmsen, C.A.** Visual detectability of dents on a composite aircraft inspection specimen: an initial study // International Journal of Applied Aviation Studies. 2004. Vol. 4, no. 2. Pp. 111–122. FAA Academy, Oklahoma City.
8. **Baaran J.** Visual inspection of composite structures: EASA-Research Project/2007/3. Final Report. Braunschweig. Germany, 2009.
9. **Cook L.** Reliability of damage detection in advanced composite aircraft structures / L. Cook, A. Boulic, D. Harris, P. Bellamy, P.E. Irving // CAA Paper 2013/03. West Sussex. UK, 2013.
10. **Komorowski, J.K., Gould, R.W., Marincak, A.** Study of the effect of time and load on impact damage visibility // Proceedings of the Second Canadian International Composites Conference and Exhibition (CANCOM 93); in W. Wallace, R. Gauvin and S. V. Hoa (Ed.). Ottawa, Ont. 1993. Pp. 441–446.
11. **Komorowski, J.P., Gould, R.W., Simpson, D.L.** Synergy between advanced composites and new NDI methods // Advanced Performance Materials. 1998. 5, 1/2. Pp. 137–151.
12. **Дубинский С.В.** Закономерности реализации случайных ударных воздействий на конструкцию крыла коммерческого самолёта / С.В. Дубинский, Ю.М. Фейгенбаум, А.А. Селихов, С.А. Гвоздев, В.М. Ордынцев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4–3. С. 604–611.

13. Фейгенбаум Ю.М. Опыт проведения и основные результаты экспериментальных исследований надежности выявления поверхностных дефектов композитной конструкции при проведении визуального контроля / Ю.М. Фейгенбаум, Е.С. Метелкин, Ю.А. Миколайчук, В.Я. Сеник, С.В. Дубинский, С.А. Гвоздев, И.Г. Хлебников // Научный Вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 14. С. 75–89.

14. Seber G., Lee A. Linear regression analysis. 2. New Jersey: John Wiley & Sons, Hoboken, 2003. 582 с.

15. Fishman G.S. Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications. New York: Springer, 1996. 698 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-2553-7

16. Wright Stephen J. Coordinate descent algorithms // Mathematical Programming. 2015. Vol. 151, iss. 1. Pp. 3–34. DOI: 10.1007/s10107-015-0892-3

17. Himmelblau D.M. Process analysis by statistical methods. New York: John Wiley & Sons, 1970. 463 p. DOI: 10.1002/aic.690170103

18. Lawless J.F. Statistical models and methods for lifetime data. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Hoboken, 2003. Pp. 478–481.

19. Efron B. Bootstrap methods: another look at the jackknife // The Annals of Statistics. 1979. Vol. 7, no. 1. Pp. 1–26.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дубинский Станислав Вячеславович, кандидат физико-математических наук, заместитель начальника отделения Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), nio18@tsagi.ru.

Фейгенбаум Юрий Моисеевич, кандидат технических наук, главный научный сотрудник, ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации (ГосНИИ ГА)», feigenbaum_ym@ncplg.ru.

Сеник Виталий Яковлевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ)», vitaly.senik@tsagi.ru.

DETERMINATION OF STRENGTH CRITERIA ON CONDITIONS OF VISUAL TESTABILITY OF IMPACT DAMAGE IN COMPOSITE AIRCRAFT CONSTRUCTIONS

Stanislav V. Dubinskiy¹, Yury M. Feygenbaum², Vitali Ya. Senik¹

¹*Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Russia*

²*The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia*

ABSTRACT

One of the principal criteria of aircraft composite design strength on the conditions of damage tolerance is the minimum defect size of accidental impact damage that is sure to be located during regular maintenance checks. Construction strength with similar (BVID – Barely Visible Impact Damage) and smaller damages must be ensured under design load. The analysis of operational factors affecting the criterion value is conducted in the paper. The effects of personnel qualification, surface color, level of contamination, distance to the object as well as defect size variations during the time due to relaxation of inner strains in the damaged construction were studied.

Research was carried out using 90 carbon fiber three stinger panels of different color and contamination levels which were subject to impact damages by a 25 mm spherical striker. Totally 80 blows were struck when applying energy within the range of 3–107 J. In the visual damage detectability test under different conditions 42 experts were participated including 25 airlines inspectors. For

the statistical analysis of empirical data and determination of dependence for the damage detection probability on its size, the Weibull function was utilized. Determination of BVID size using "90/95" criterion was performed by means of the bootstrap method (95% of inspectors must detect not less than 90% of defects with the size not smaller than BVID). The results obtained in this study enabled to access the degree of various operational factors impact on reliability of damage detectability during the visual inspection and determine BVID values depending on the combination of the given factors. In particular, it was demonstrated that from all the viewing distances the defects in polymer composite materials are more detectable on the blue surface than on the gray and red ones. Conducted research demonstrated a significant effect of relaxation (the reduction effect of the surface defect sizes in the composite panel affected by different factors during time span) on the probability of defect detectability during operation. Also water saturation of the construction under excessive temperatures has the critical compared with other factors impact on relaxation of damages in polymer composite materials. The obtained results accord with the data in foreign publications making them more supplement and specific. On the basis of conducted research the entire range of recommendations for aircraft designers and operators utilizing composite constructions is formulated.

Key words: composite construction, Barely Visible Impact Damage (BVID), inspection, relaxation.

REFERENCES

1. Horton, R., and Whitehead, R. (1988). Damage tolerance of composites: final report, Rept. AFWAL-TR-87-3030, Wright-Patterson AFB, OH.
2. Kan, H. P., Cordero, R., and Whitehead, R.S. (1997). Advanced certification methodology for composite structures, Rept. DOT/FAA/AR-96/111, Naval Air Warfare Center-Aircraft Division Department of the Navy, Patuxent River, MD.
3. Tropis, A. Thomas, M. Bounie, J. and Lafon, P. (1995). *Certification of the composite outer wing of the ATR72*. Proceedings of the Institution of mechanical Engineers Part G, vol. 209, issue, 4, Pp.327–339. DOI: 10.1243 / PIME_PROC_1995_209_307_02
4. Fawcett, A.J., and Oaks, G.D. (2006). Boeing composite airframe damage tolerance and service experience, workshop for composite damage tolerance and maintenance: Presentation #2 of Session 1, National Institute for Aviation Research, Chicago, IL.
5. Morteau, E., and Fualdes, C. (2006). *Airbus composite airframe damage tolerance methodology, workshop for composite damage tolerance and maintenance: Presentation #1 of Session I*, National Institute for Aviation Research, Chicago, IL.
6. Spencer F.W. (1996). Visual inspection: Research Project Report on Benchmark Inspections. Technical Report No DOT/FAA/AR-96/65, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington, D.C., 59 p. DOI: 10.21949/1403546
7. Erhart, D., Ostrom, L.T. and Wilhelmsen, C.A. (2004). *Visual detectability of dents on a composite aircraft inspection specimen: an initial study*. // International Journal of Applied Aviation Studies, FAA Academy, Oklahoma City, vol. 4, no. 2, pp. 111–122.
8. Baaran J. (2009). *Visual inspection of composite structures*. EASA-Research Project/2007/3 Final Report, Braunschweig, Germany.
9. Cook, L., Boulic, A., Harris, D., Bellamy, P. and Irving, P.E. (2013). *Reliability of damage detection in advanced composite aircraft structures*. CAA Paper 2013/03, West Sussex, UK.
10. Komorowski, J. K., Gould, R. W. and Marincak, A. (1993). *Study of the effect of time and load on impact damage visibility*. Proceedings of the Second Canadian International Composites Conference and Exhibition (CANCOM 93), in W. Wallace, R. Gauvin and S. V. Hoa (Ed.). Ottawa, Ont., pp. 441–446.
11. Komorowski, J.P., Gould, R.W. and Simpson, D.L. (1998). *Synergy between advanced composites and new NDI methods*. //Advanced Performance Materials, 5, 1/2, pp. 137–151.
12. Dubinskiy, S.V., Feygenbaum, Yu.M., Selikhov, A.A., Gvozdev, S.A. and Ordintsev, V.M. (2016) *Study of in-service accidental impacts on the wing construction of a commercial aircraft*. Izvestia of Samara Scientific Center of The Russian Academy of Sciences, vol. 18, no. 4–3, pp. 604–611. (in Russian).

13. Feygenbaum, Yu.M., Metelkin, E.S., Mikolaychuk, Yu.A., Senik, V.Ya., Dubinskiy, S.V., Gvozdev, S.A. and Khlebnikov, I.G. (2016) *Experience and principal results of analytical and experimental studies focused on evaluation of composite skin defect visual detection reliability*. Scientific Herald of The State Research Institute of Civil Aviation, no. 14, pp. 75–89. (In Russian)
14. Seber, G. and Lee, A. (2003). *Linear regression analysis*. 2nd edition, New Jersey: John Wiley & Sons, Hoboken, 582 p.
15. Fishman G.S. (1996). *Monte Carlo: concepts, algorithms and applications*. New York: Springer, 698 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-2553-7
16. Wright Stephen J. (2015). *Coordinate descent algorithms*. //Mathematical Programming, vol. 151, issue1, pp. 3–34. DOI: 10.1007/s10107-015-0892-3
17. Himmelblau D.M. (1970). *Process analysis by statistical methods*. New York: John Wiley & Sons, 463 p. DOI: 10.1002/aic.690170103
18. Lawless J. F. *Statistical models and methods for lifetime data*. 2nd edition, New Jersey: John Wiley & Sons, Hoboken, pp. 478–481.
19. Efron B. (1979). *Bootstrap methods: another look at the jackknife*. The Annals of Statistics, vol. 7, no. 1, pp. 1–26.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stanislav V. Dubinskiy, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Head of the Department of the Central Aerohydrodynamic Institute, nio18@tsagi.ru.

Yury M. Feygenbaum, Candidate of Technical Sciences, Chief Research Scientist of FGUP the State Scientific Research Institute of Civil Aviation, feygenbaum_ym@ncplg.ru.

Vitali Ya. Senik, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Scientist of FGUP the Central Aerohydrodynamic Institute, vitaly.senik @tsagi.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

28.05.2019
14.11.2019

Received
Accepted for publication

28.05.2019
14.11.2019